

二次元越波堤による波浪エネルギー獲得に関する 基礎的研究

Study on the Gain of Wave Energy by Overtopping Activated by a Two-Dimensional Structure

小松利光*・松永信博**・増輪一彦***・植田 操****・藤田和夫*****

Toshimitsu Komatsu, Nobuhiro Matsunaga, Kazuhiko Masuwa,

Misao Hashida and Kazuo Fujita

For the utilization of ocean wave energy, we have proposed the method to gain the difference of water head by the wave overtopping. The devised artificial structure is composed of two parts. One is the dam with a slope to activate the wave overtopping and effectively gain the difference of water head, and the other is the walls to converge the widely distributed wave-energy. In this paper, the inflow rate by the wave overtopping and the optimum shape of the dam have been obtained experimentally in the case when two-dimensional regular waves climb up the slope. It is also made clear that the equipment of the converging walls increases remarkably the amount of wave overtopping.

Keywords: wave energy utilization, wave overtopping.

1. はじめに

自然エネルギーを利用して海域で方向性をもつ流れを定常的に発生させる技術の開発は、閉鎖性海域の水質浄化や人工湧昇流による漁場開発等において非常に有用である。我々のプロジェクト・チームは沿岸の波浪を人工構造物を用いて越波させ、得られた水位差を利用して一方向の流れを発生させる方法を提案した¹⁾。これまで、海岸工学における越波に関する研究は、堤内地保護のため極力越波を防ぐという立場に立ったものであった^{2)~6)}。

一方、越波を利用した波浪エネルギー獲得に関する研究においては、より多くの越波量および水位差を得るためにはどのような形状の構造物が効果的であるかという点に主眼が置かれている。このような立場からなされた研究として宮江・手操⁷⁾と川村ら^{8)・9)}の研究が挙げられる。宮江・手操は集波堤と越波堤から成る三次元構造物を用いて分散している波浪エネルギーを位置エネルギーに変換するための水理実験を行った。その結果、越波堤の法面勾配は $1/\sqrt{3}$ が最適であること、波浪エネルギー密度を高めるために必要な集波堤の集波比（集波堤の入口幅に対する出口幅の比）は $1/6$ が効果的であることを明らかにした。川村らは、越波を積極的に利用して外海水の導入を促進するための技術開発を試みている。彼らは、V字集波堤と潜堤を用いて越波量を増大させる実験を行い、集波堤の開角度が 45° で潜堤の天端が静水面よりやや高いときに越波量が最大となることを示した。しかしながら、これまでのところ越波による波浪エネルギーの有効利用に関する研究が十分行われているとは言えないように思われる。この立場からの技術開発のためには、最大越波量を生ずる構造物の最適形状を決定するための詳細な研究が必要である。

本研究では、二次元越波堤形状に関する実験を系統的に行い、越波量の定量的評価法を提案している。また、決定された最適二次元越波堤にV字状集波堤を取付け、入射波の波高を増幅させた場合における越波量の増大率についても検討している。

2. 実験装置および実験方法

実験では、図-1に示すような二次元造波水槽が用いられた。水槽の長さは16m、高さは0.6m、幅は0.25mであった。水槽の平坦部の水深を36cmに固定し、傾斜底面の勾配を $1/30$ に設定した。傾斜面上に越

* 正会員 九州大学工学部水工土木学科 (〒812 福岡市東区箱崎6丁目10-1)

** // 九州大学大学院総合理工学研究科

*** // 鹿島建設株式会社

**** // 日本文理大学工学部土木工学科

***** // 九州大学工学部水工土木学科

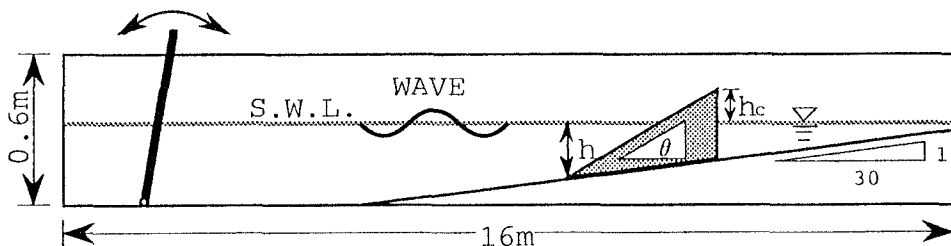


図-1 二次元造波水槽

波堤を設置し、越波量を測定した。1入射波による単位幅当たり越波量 Q は沖波波長 L_o 、沖波波高 H_o 、堤脚水深 h 、天端高 h_c および越波堤の法面勾配の逆数 $\cot\theta$ に依存するものと考えられる。これらの諸量間の関係を次元解析を用いて無次元表示すると無次元越波量 $Q/H_o L_o$ は、

$$Q/H_o L_o = f(H_o/L_o, h_c/H_o, \cot\theta, h/L_o)$$

で表される。

本研究で行った実験は3つに分類される。最初の実験は、二次元越波堤の最適形状を決定するためのものである。法先水深 h を8.6cmに固定し、表-1に示すように $\cot\theta$ を9通り、 h_c を4通りそれぞれ独立に変化させた。従って、36種類の実験が行われたことになる。入射波としては、堤脚水深に達するまで砕波しないような5種類の波形勾配の波が選ばれた。この場合、 h/L_o は0.04から0.084の範囲で変化した。このパラメータへの依存性については次の実験で詳細に検討することとし、取敢えずここでは h/L_o の変化は越波堤の最適形状にはそれ程大きな影響を与えないものとみなした。

次に、相対水深 h/L_o が無次元越波量 $Q/H_o L_o$ に及ぼす影響を明らかにするため、無次元パラメータ H_o/L_o 、 h_c/H_o 、 h/L_o を種々独立に変化させる実験を行った。無次元パラメータ $\cot\theta$ については、それぞれの入射波に対して最大無次元越波量を生ずる法面勾配（これらは最初の実験結果に基づいて算定されたもの）を用いた。

入射させる波の周期は0.8sに設定した。従って、沖波波長 L_o は99.8cmであった。造波板の振幅を変化させ、表-2に示すように3種類の波形勾配の波を造った。 h/L_o は越波堤の設置位置を変えることにより広範囲において変えられた。越波堤の天端高 h_c は越波が生ずる範囲で適宜設定された。

最後に、越波量に及ぼす集波堤の効果を知るための試験の実験として、前の実験で決定された最適二次元越波堤にV字状集波堤を取付けた三次元構造物に関する実験を行った。実験においては、 $H_o/L_o = 2.75 \times 10^{-2}$ の波を $h_c = 2.3$ cm、 $\cot\theta = 2.3$ の越波堤に入射させた。集波堤の入口幅 b_1 を25cmに、集波堤の堤長の波の進行方向への投影距離（集波距離） l を40cmに固定し、集波堤の出口幅 b_2 をえることにより集波比 b_1/b_2 を1.0, 1.25, 1.67, 2.5, 5.0, 10と6通り変化した。

測定においては越波量が多いときには造波開始後第6波から第10波の5波について、また少ない場合には第6波から第15波の10波による越波量を5回ずつ測定し、その平均から入射波1波による単位幅当たりの越波量 Q (cm²/1波)を求めた。

3. 実験結果およびその考察

3.1 最適越波堤形状

ここでは、最初の実験で得られた結果に基づいて、越波量の定量的評価ならびに最大越波量を生じる最適越波堤形状について考察する。

表-1 越波堤の最適形状を決定するための実験の条件

H_o/L_o	$\cot\theta$	h_c (cm)
2.02×10^{-2}	0.0, 1.0	1.0
3.28×10^{-2}	1.41, 1.73	3.0
4.49×10^{-2}	2.0, 2.3	5.0
5.27×10^{-2}	2.6, 3.0	7.0
6.59×10^{-2}	4.0	

表-2 越波量に及ぼす h/L_o の影響を検討するための実験の条件

H_o/L_o	h (cm)	h/L_o
1.29×10^{-2}	3.5	3.51×10^{-2}
	5.2	5.21×10^{-2}
2.75×10^{-2}	6.8	6.81×10^{-2}
	8.5	8.52×10^{-2}
3.63×10^{-2}	10.1	1.01×10^{-1}

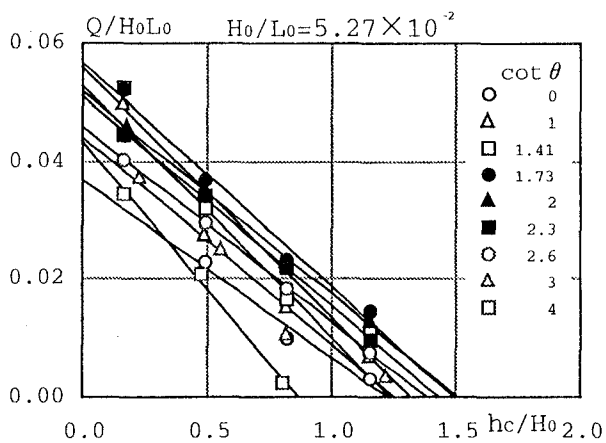


図-2 $H_0/L_0=5.27 \times 10^{-2}$ の波における Q/H_0L_0 と h_c/H_0 の関係

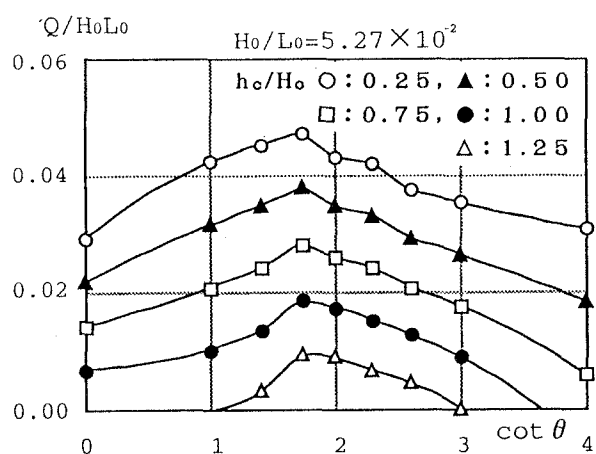
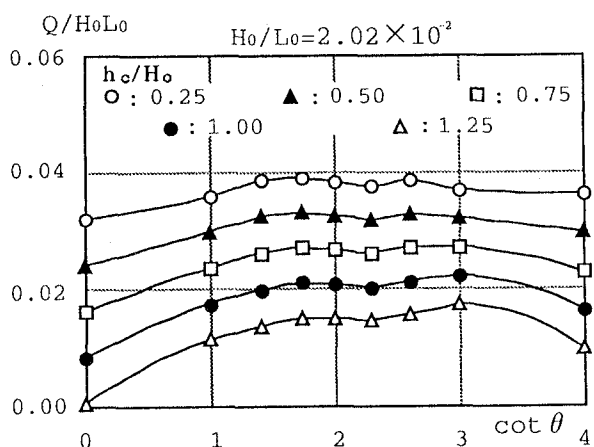
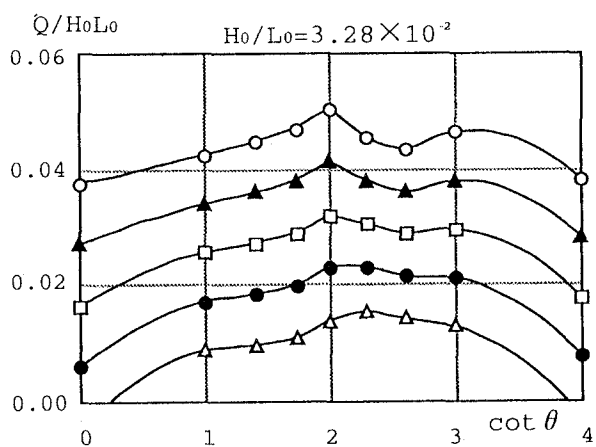


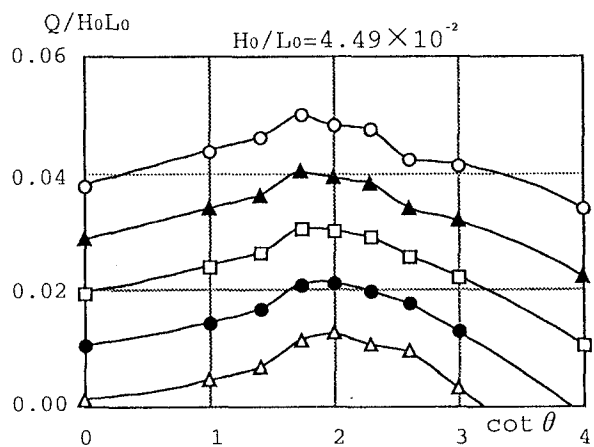
図-3 $H_0/L_0=5.27 \times 10^{-2}$ の波における Q/H_0L_0 と $\cot \theta$ の関係



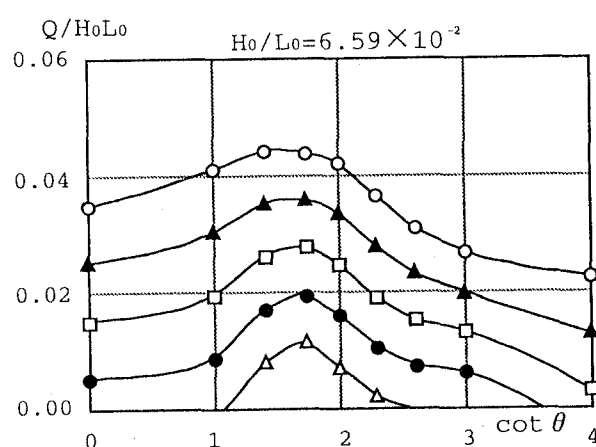
(a)



(b)



(c)



(d)

図-4 それぞれの入射波に対する Q/H_0L_0 と $\cot \theta$ の関係

図-2は $H_0/L_0=5.27 \times 10^{-2}$ の波に対する無次元越波量を $\cot \theta$ をパラメータとして相対天端高に対してプロットしたものである。無次元越波量は相対天端高が増加するにつれ、 $\cot \theta$ に無関係に単調に減少することがわかる。

図-2から $h_c/H_0=0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25$ における Q/H_0L_0 の値を内挿から求め、 h_c/H_0 をパラメータに Q/H_0L_0 の値を $\cot \theta$ に対してプロットしたものが図-3である。最大無次元越波量 $(Q/H_0L_0)_{\max}$ は、 h_c/H_0 の値に無関係に $\cot \theta = 1.73$ の時に生じ、 $\cot \theta$ が 1.73 よりも大きくても小さくても Q/H_0L_0 は減少することがわかる。

$H_0/L_0=2.02 \times 10^{-2}, 3.28 \times 10^{-2}, 4.49 \times 10^{-2}, 6.59 \times 10^{-2}$ の波に関しても同様な手順を踏み、 Q/H_0L_0 の値を $\cot \theta$ に対してプロットしたものが図-4(a)～(d)である。沖波波形勾配が小さいときは無次元越波量は明瞭な最大値をとらないが、波形勾配が増大するにつれ最大無次元越波量の存在が明瞭となってくる。また、 $H_0/L_0=5.27 \times 10^{-2}$ の波の場合と同様、相対天端高が増大するに従って無次元越波量は減少する。 $(Q/H_0L_0)_{\max}$ が生ずる時の $\cot \theta$ の値は $1.73 \sim 2.5$ の範囲にあり、沖波波形勾配が大きくなるにつれて 1.73 に近づく傾向にある。これは宮江・手操による研究結果と一致している。 H_0/L_0 が一定のとき $(Q/H_0L_0)_{\max}$ となる $\cot \theta$ の値は相対天端高には依存せずほぼ一定値をとる傾向が認められる。

図-3と図-4(a)～(d)に示された Q/H_0L_0 と $\cot \theta$ の関係を普遍表示するために、無次元越波量と法面勾配に関する代表量を図-5で定義する。

$(Q/H_0L_0)_{\max}$ は最大無次元越波量であり、そのときの $\cot \theta$ の値を $(\cot \theta)_{\max}$ とする。 $(\cot \theta)_{\max}/2$ における無次元越波量を $(Q/H_0L_0)_*$ と定義する。

図-6は、図-3と図-4(a)～(d)からこれらの代表量を読み取り、無次元越波量を規格化したものである。 $\cot \theta / (\cot \theta)_{\max} > 2$ と $\cot \theta / (\cot \theta)_{\max} < 1/2$ の領域ではデータにかなりのばらつきが見られるが、我々が最も必要とする最大越波量付近は最小二乗近似曲線で十分普遍的に表示されることがわかる。

任意の $\cot \theta, h_c, H_0, L_0$ などの水理条件のもとで図-6のグラフを用いて越波量を算定するには、 $(Q/H_0L_0)_{\max}, (Q/H_0L_0)_*, (\cot \theta)_{\max}$ の定量化が必要である。図-7は、最大無次元越波量 $(Q/H_0L_0)_{\max}$ と相対天端高の関係を示している。図-2と同様、 $(Q/H_0L_0)_{\max}$ も H_0/L_0 にほぼ無関係に h_c/H_0 が増加するにつれて単調に減少する。

図-8は図-5で定義された $(Q/H_0L_0)_*$ と h_c/H_0 の関係を示している。 $(Q/H_0L_0)_*$ も $(Q/H_0L_0)_{\max}$ と同様 H_0/L_0 にほとんど依存せず相対天端高が増加するにつれて減少し、 $(Q/H_0L_0)_*$ は h_c/H_0 のみの関数として、図中の最小二乗近似曲線で表される。

図-9は $(\cot \theta)_{\max}$ と H_0/L_0 の関係を示している。 h_c/H_0 が変化しても $(\cot \theta)_{\max}$ の値には大きな変化は見られない。従って、 $2.02 \times 10^{-2} <$

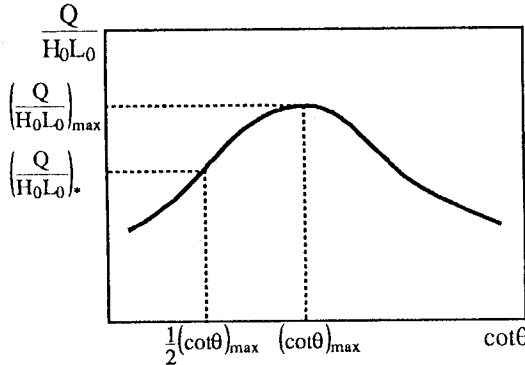


図-5 無次元越波量を普遍表示するための代表諸量

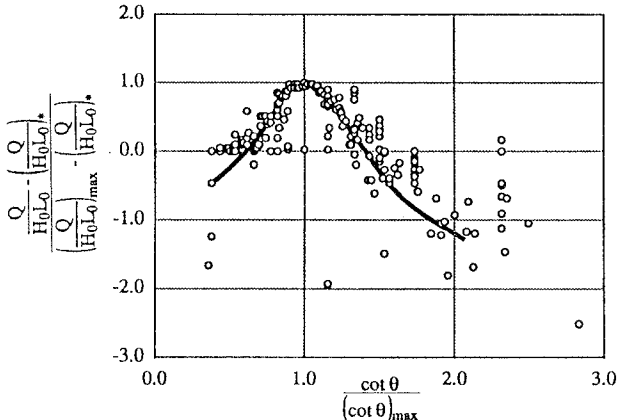


図-6 無次元越波量の普遍表示

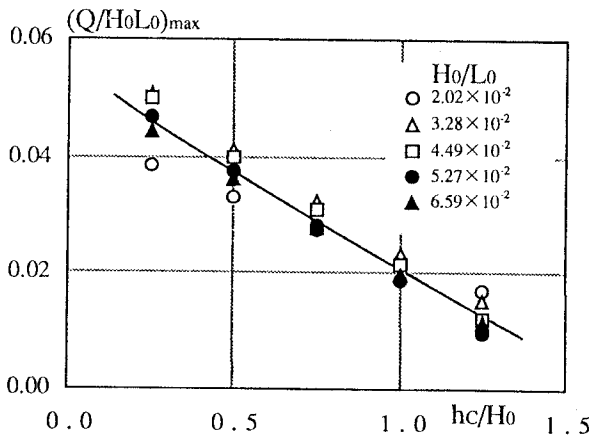


図-7 $(Q/H_0L_0)_{\max}$ と h_c/H_0 の関係

$H_0/L_0 < 6.59 \times 10^{-2}$ の波に対し無次元越波量を最大にするのり面勾配 $\tan \theta$ は $1/\sqrt{3} \sim 1/2.5$ の範囲で一義的に決定される。

以上の結果から、沖波波高 H_0 、沖波波長 L_0 の波が入射してくる海域に越波堤を造り、一方向の流れを発生させるために必要な水位差が h_c である場合、図-7、8、9を用いて堤体の最適法面勾配と最大越波量が決定される。また、任意の法面勾配に対しても、図-6より越波量が算定できることになる。

3.2 越波堤設置水深の影響

§3.1で言及しなかった無次元パラメータ h/L_0 の Q/H_0L_0 に及ぼす影響について、 h/L_0 を $0.035 \sim 0.101$ の範囲で変化させることにより詳細に調べた。図-10は h/L_0 および H_0/L_0 をパラメータとして Q/H_0L_0 の値を h_c/H_0 に対してプロットしたものである。この一連の実験においては、前述の様にそれぞれの沖波波形勾配に対して無次元越波量が最大となる $\cot \theta$ が図-9から算定され、採用されている。従って、測定された Q/H_0L_0 は $(Q/H_0L_0)_{\max}$ に対応する。図中の×印は図-7で示されたデータである。入射波が砕波水深近くまで伝播し浅水変形をかなり受ける場合を除いて Q/H_0L_0 は h/L_0 にほとんど依存しないことがわかる。また h_c/H_0 を一定に保った場合、浅水変形をできる限り受けない方が大きな越波量を効率よく獲得することができる。浅水変形を受けない場合、最大無次元越波量は h/L_0 、 H_0/L_0 に依存せず、 h_c/H_0 のみの単調関数で表されることが明かとなった。このことは、§3.1で h/L_0 の変化を考慮せずに Q/H_0L_0 を残りの3つのパラメータのみに依存するとして整理したことが妥当であったことを裏付けるものである。

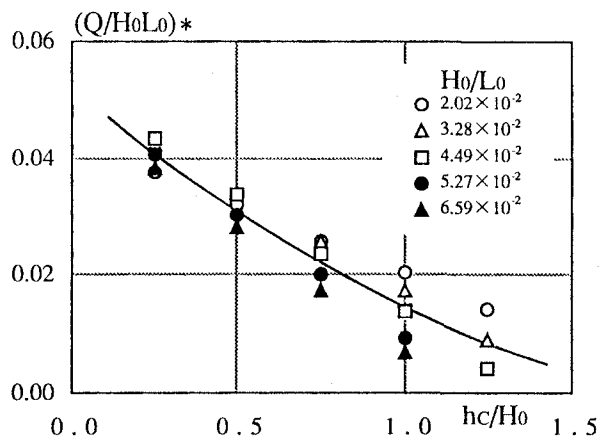


図-8 $(Q/H_0L_0)^*$ と h_c/H_0 の関係

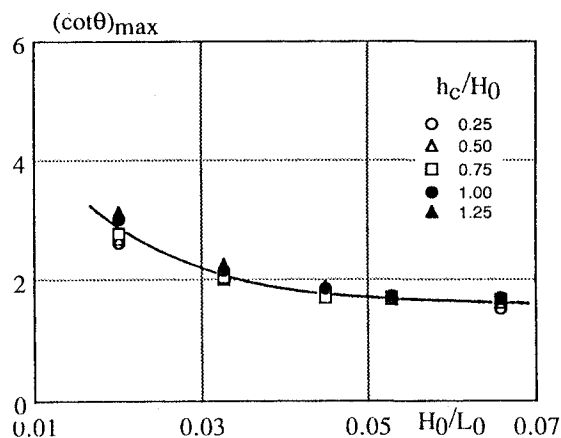


図-9 $(\cot \theta)_{\max}$ と H_0/L_0 の関係

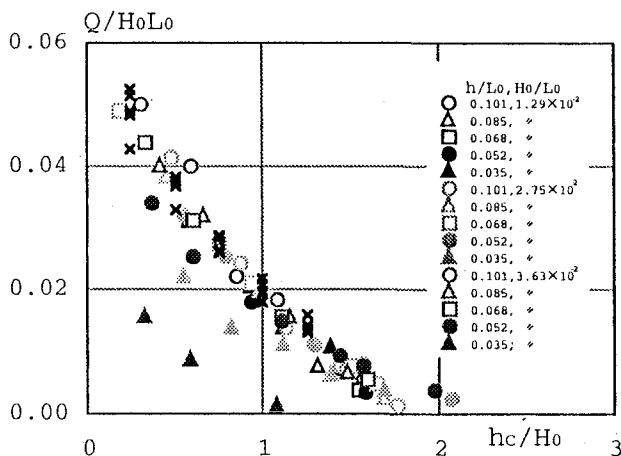


図-10 Q/H_0L_0 と h_c/H_0 の関係

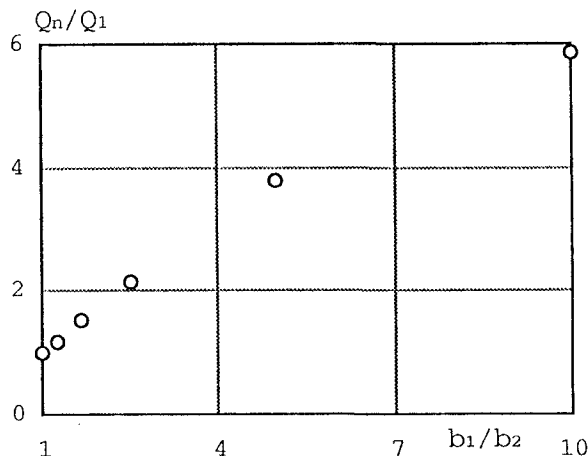


図-11 Q_n/Q_1 と b_1/b_2 の関係

3.3 V字状集波堤の効果

図-11は、集波比 b_1/b_2 の値が n のときの一周期、単位幅当たりの越波量 Q_n を二次元越波堤のみによって得られる越波量 Q_1 で除した無次元越波量比 Q_n/Q_1 を b_1/b_2 に対してのプロットしたものである。今回の実験条件のもとでは Q_n/Q_1 は常に1.0以上の値をとり、 $b_1/b_2=10$ 、 $b_2/l=0.0625$ の条件のもとでは $Q_n/Q_1 \approx 6$ まで増加していることがわかる。この試験的実験から、越波量をさらに効率よく獲得するには越波堤と集波堤の結合が大変有効であることが示された。

4. おわりに

二次元越波堤に関する系統的な実験を広範囲の条件のもとで行うことにより、越波量の定量的評価ならびに最適越波堤形状を経験的に決定することが可能となった。また、この最適二次元越波堤にV字状集波堤を取り付ける試験的実験により、さらに大きな越波量を効率よく獲得することが可能であることが明らかとなった。今後は、二次元越波堤とV字状集波堤からなる三次元構造物における越波量の定量的評価を試みる予定である。

本研究は人工湧昇流開発利用研究会の援助を受けて行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 小松利光・松永信博・藤田和夫・増輪一彦・細山田得三・樋田 操：越波を利用した水位差獲得に関する基礎的研究，水工学論文集，第35巻，pp.549-554，1991.
- 2) 合田良実：防波護岸の越波流量に関する研究，港湾技術研究所報告，第9巻，第4号，pp.1-41，1970.
- 3) 合田良実・岸良安治・神山 豊：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第14巻，第4号，pp.3-44，1975.
- 4) 高山知司・永井紀彦・西田一彦：各種消波工による越波流量の減少効果，港湾技術研究所報告，第21巻，第2号，pp.151-189，1982.
- 5) 山本正昭・西 裕司：越波の少ない低天端堤の開発，第35回海岸工学講演会論文集，pp.537-541，1984.
- 6) 井上雅夫・島田広昭・本田静高・殿最浩司：不規則波の越波量，第31回海岸工学講演会論文集，pp.582-586，1988.
- 7) 宮江伸一・手操能彦：集波堤による波浪エネルギーの位置エネルギーへの変換実験，第1回波浪エネルギー利用シンポジウム論文集，pp.145-154，1984.
- 8) 川村正司・小松英則・山本 敦・中野 晋・三井 宏：V字状集波堤と潜堤による越波量の増大，海岸工学論文集，第36巻，pp.623-627，1989.
- 9) 川村正司・中野 晋・三井 宏：越波と潮汐による海水交流の促進計画，海洋開発論文集，第7巻，pp.381-386，1991.